

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2019

Jan Kašpárek

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Měření chyby proudového transformátoru v závislosti na zátěži, vliv
polohy vodiče na chyby proudových kleští

Measurement of Load Current Transformer Error, Influence of the Wire
Position on the Current Clamp Error

Zadání bakalářské práce

Student:

Jan Kašpárek

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612R041 Řídicí a informační systémy

Téma:

**Měření chyby proudového měřicího transformátoru v závislosti
na zátěži, vliv polohy vodiče na chybu proudových kleští**
**Measurement of Load Current Transformer Error, Influence of the Wire
Position on the Current Clamp Error**

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem řešení bakalářské práce je tvorba SW aplikace pro automatizované měření chyby měřicího transformátoru proudu v závislosti na zatížení sekundárního okruhu a zjištění vlivu polohy měřeného vodiče na chybu při měření proudovými kleštěmi.

Body zadání:

1. Studium vlastností kalibrátoru OMICRON CMC256.
2. Tvorba SW aplikace pro komunikaci s kalibrátorem pomocí přístrojového driveru.
3. Tvorba SW aplikace pro ověření chyby proudového transformátoru v závislosti na jeho zátěži.
4. Tvorba SW aplikace pro ověření vlivu polohy vodiče na chybu při měření proudovými kleštěmi.
5. Ověření aplikací při praktickém měření.
6. Zhodnocení výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. Praha: BEN – technická literatura, 2008, 247 s. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [2] WITTASSEK, Tomáš. *Virtuální instrumentace I*. Sylaby do předmětu Virtuální instrumentace I. Ostrava 2012. 264 s.
- [3] KOVAL, Ludvík. *Elektrická měření - učební text a návody do cvičení*. VŠB-TU Ostrava. 2012. 147 s. Dostupné také z: <http://lms.vsb.cz/course/view.php?id=31362>.
- [4] OMICRON. *Getting Started with OMICRON Test Universe 3.0, uživatelský manuál kalibrátoru*. Austria. 2013. 42 s.
- [5] OMICRON. *CMC 256 Hardware, referenční příručka kalibrátoru*. Austria. 2007. 113 s.
- [6] OMICRON. *Advanced Protection Package, uživatelská příručka kalibrátoru*. Austria. 2001. 172 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

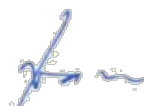
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ludvík Koval, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



doc. Ing. Jiří Kozíorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto celou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením svého vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě: 30.4.2019

Podpis studenta:

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Kajst', written in a cursive style.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ludvík Koval, Ph.D. za odbornou pomoc při měření a konzultaci při vytváření této práce a aplikací.

Abstrakt

Hlavním cílem této bakalářské práce je vytvořit v programu LabVIEW aplikace, které budou komunikovat s kalibrátorem OMICRON CMC256plus a použitými měřicími přístroji (multimetr AgilentU3606B, wattmetr YokogawaWT230). První z těchto aplikací má za úkol automatizovaně měřit chybu proudového transformátoru v závislosti na zátěži v sekundárním obvodu a druhá aplikace bude měřit chybu proudových kleští v závislosti na poloze vodiče.

Klíčová slova

OMICRON CMC256plus; LabVIEW; Transformátor; Relativní chyba; Přístrojové ovladače;

Abstract

The main goal of this bachelor thesis is to create an applications in LabVIEW program that will communicate with the calibrator OMICRON CMC256plus and used measuring instruments (multimeter AgilentU3606B, wattmeter YokogawaWT230). The first of these applications is designed to automatically measure a error of the current transformer depending on the load in the secondary circuit and the second application will measure the current clamp error depending on the wire position.

Keywords

OMICRON CMC256plus; LabVIEW; Transformer; Relatice error; Drivers;

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam použitých symbolů | 10 |
| Seznam zkratk | 11 |
| Seznam obrázků | 12 |
| Seznam tabulek..... | 13 |
| 1. Úvod..... | 14 |
| 2. Transformátory | 15 |
| 2.1. Princip transformátoru..... | 15 |
| 2.2. Převod transformátoru..... | 15 |
| 2.3. Účinnost | 16 |
| 2.4. Přístrojové transformátory..... | 16 |
| 2.4.1. Měřicí transformátory proudu | 17 |
| 2.4.2. Měřicí transformátory napětí..... | 17 |
| 3. Chyby měření | 18 |
| 3.1. Dělení chyb | 18 |
| 4. LabVIEW..... | 19 |
| 4.1. Rozdělení VI | 19 |
| 4.2. Přístrojové ovladače | 21 |
| 5. OMICRON CMC 256plus | 22 |
| 5.1. Přední panel..... | 22 |
| 5.1.1. Proudové výstupy | 23 |
| 5.1.2. Napěťové výstupy | 23 |
| 6. AgilentU3606B..... | 24 |
| 6.1. Specifikace digitálního multimetru | 24 |
| 7. YOKOGAWA WT230 | 25 |
| 8. Tvorba aplikace..... | 26 |
| 8.1. Komunikace s kalibrátorem OMICRON CMC256plus | 26 |
| 8.2. Komunikace s YokogawaWT230 a AgilentU3606B | 27 |
| 8.3. Přední panel..... | 29 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 8.3.1. | Přední panel Aplikace1 (závislost na zátěži)..... | 29 |
| 8.3.2. | Přední panel Aplikace2 (Závislost na poloze vodiče) | 30 |
| 8.4. | Princip aplikace | 31 |
| 8.4.1 | Aplikace1 (závislost na zátěži)..... | 31 |
| 8.4.2. | Aplikace2 (závislost na poloze vodiče)..... | 33 |
| 9. | Nejistoty měření..... | 35 |
| 10. | Schéma zapojení a použité přístroje..... | 36 |
| 10.1. | Schéma zapojení měření chyby zátěže | 37 |
| 10.2. | Schéma zapojení poloha vodiče | 38 |
| 11. | Naměřené hodnoty a zhodnocení..... | 39 |
| 11.1. | Měření v závislosti na zátěži | 39 |
| 11.2. | Měření v závislosti na poloze vodiče | 41 |
| 12. | Závěr..... | 43 |
| | Literatura..... | 44 |
| | Přílohy | 46 |

Seznam použitých symbolů

| | | |
|---------------|------------------------------------|--------------|
| U_1 | Napětí na primárním vinutí | [V] |
| I_1 | Proud na primárním vinutí | [A] |
| Φ_1 | Magnetický tok na primárním vinutí | [Wb] |
| U_2 | Napětí na sekundárním vinutí | [V] |
| I_2 | Proud na sekundárním vinutí | [A] |
| Φ_m | Maximální indukční tok | [Wb] |
| K | Převod transformátoru | [-] |
| N_1 | Počet závitů primárního vinutí | [-] |
| N_2 | Počet závitů sekundárního vinutí | [-] |
| f | kmitočet | [Hz] |
| U_{1N} | Jmenovité primární napětí | [V] |
| U_{2N} | Jmenovité sekundární napětí | [V] |
| $\cos\varphi$ | Účinník transformátoru | [-] |
| P_1 | Činný příkon transformátoru | [W] |
| P_2 | Činný výkon transformátoru | [W] |
| P | Zdánlivý výkon | [VA] |
| R | Činná složka břemene | [Ω] |
| X | Jalová složka břemene | [Ω] |
| u_A | Nejistota měření typu A | [-] |
| u_B | Nejistota měření typu B | [-] |
| u_c | Celková nejistota měření | [-] |
| u_k | Rozšířená nejistota měření | [-] |

Seznam zkratek

| | | |
|-----|---------------------------------|-------------------------------|
| VI | „Virtual Instrument“ | Virtuální přístroj |
| GPB | „General Purpose Interface Bus“ | Sběrnice univerzální rozhraní |
| USB | „Universal Serial Bus“ | Univerzální sériová sběrnice |
| AC | „Alternating Current“ | Střídavé napětí/proud |
| DC | „DirectCurrent“ | Stejnoseměrné napětí/proud |
| RDG | „Readings“ | vyčtené hodnota z multimetru |
| FS | „Fullscale“ | chyba měřícího přístroje |
| CSV | „Comma-Separated Values“ | Hodnoty oddělené čárkami |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1. Příklad čelního panelu | 20 |
| Obrázek 2. Příklad blokového diagramu | 20 |
| Obrázek 3. Ikony a terminál SubVI | 21 |
| Obrázek 4. Čelní panel a blokový diagram přístrojového ovladače..... | 21 |
| Obrázek 5. Kalibrátor OMICRON CMC256plus [9] | 22 |
| Obrázek 6. Proudové výstupy kalibrátoru [10] | 23 |
| Obrázek 7. Napět'ové výstupy kalibrátoru [10]..... | 23 |
| Obrázek 8. Multimetr AgilentU3606B [13] | 24 |
| Obrázek 9. Přesnost multimetru AgilentU3606B [11] | 25 |
| Obrázek 10. Wattmetr YokogawaWT230 [14] | 25 |
| Obrázek 11. Inicializace systémů kalibrátoru | 26 |
| Obrázek 12. Nastavení parametrů pro proud a frekvenci..... | 27 |
| Obrázek 13. Inicializace systémů wattmetru..... | 27 |
| Obrázek 14. Nastavení vyčítání měřených hodnot..... | 28 |
| Obrázek 15. Nastavení nepřetržitého měření | 28 |
| Obrázek 16. Přední panel (Aplikace1) | 29 |
| Obrázek 17. Přední panel (Aplikace2) | 30 |
| Obrázek 18. SubVI pro výpočet chyb | 31 |
| Obrázek 19. Transformace proudu uvnitř aplikace | 31 |
| Obrázek 20. Vývojový diagram (Aplikace1) | 32 |
| Obrázek 21. Ukládání výsledků do CSV souboru..... | 33 |
| Obrázek 22. Vývojový diagram (Aplikace2) | 34 |
| Obrázek 23. Laboratorní transformátor TL20 | 36 |
| Obrázek 24. Proudové kleště MN39 | 37 |
| Obrázek 25. Schéma zapojení (v závislosti na zátěži) | 37 |
| Obrázek 26. Schéma zapojení (V závislosti na poloze) | 38 |
| Obrázek 27. Závislost chyby při měření bez zátěže | 40 |
| Obrázek 28. Závislost chyby s maximální zátěží..... | 41 |
| Obrázek 29. Závislost chyby na poloze vodiče při 5 A..... | 42 |
| Obrázek 30. Závislost chyby na poloze vodiče při 20 A..... | 42 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 1. Třídy přesnosti transformátoru..... | 17 |
| Tabulka 2. Nastavení použitých přístrojů..... | 39 |
| Tabulka 3. Naměřené hodnoty pro maximální zátěž..... | 39 |
| Tabulka 4. Měřená chyby v závislosti na poloze vodiče při 5 A | 41 |

1. Úvod

Když provádíme jakékoliv laboratorní měření a transformujeme proud, hlavním cílem je mít co nejpresnější měřené hodnoty. Jelikož do transformátoru nevidíme, nemůžeme si být jistí, zda zrovna daná měřená hodnota není ovlivněna nějakou vnitřní chybou transformátoru nebo připojenou zátěží na sekundárním obvodu transformátoru. To samé platí i pro vliv polohy vodiče při měření proudovými kleštěmi, jelikož při praktických měřeních se nestává, že by vodič byl při měření udržován přesně ve středu proudových kleští. Často bývají zavěšeny na měřený vodič nebo jinak položeny. Díky tomu však může dojít ke zkreslení výsledku.

Proto cílem této práce bylo vytvoření dvou softwarových aplikací. První by proměřila daný proudový rozsah a změřila chybu transformátoru v závislosti na zatížení sekundárním obvodu. A druhá by měřila vliv polohy vodiče na chybu proudových kleští. Nejprve se však bylo nutné seznámit se s transformátory a jejich vlastnostmi. Také bylo třeba se obeznámit s kalibrátorem OMICRON CMC256plus, který nám posloužil ke generování velmi přesného proudu a také s příslušnými měřicími přístroji. Následně také seznámení s vývojovým prostředím LabVIEW a s prací s přístrojovými ovladači. Poté se přechází k postupu při tvorbě aplikací, jejich principu a funkci jednotlivých částí. Závěr práce se pak zabývá zhodnocením výsledků a tím, jak zátěž a poloha vodiče ovlivňuje měřené hodnoty.

2. Transformátory

Transformátory jsou dle ČSN 34 5125 řazeny jako netočivé elektromagnetické stroje pracující na principu elektromagnetické indukce, který slouží k přeměně elektrické energie o určitém napětí na elektrickou energii o jiném, popřípadě stejném napětí a to bez přispění mechanické energie. Nejčastěji se s transformátory setkáme v energetice, kde se používají k distribuci elektrické energie za ekonomicky nejvýhodnějších podmínek. Tedy v místě výroby jsou instalovány zvyšovací transformátory, které dodají do přenosové sítě právě to nejvyšší napětí při co nejmenší ztrátě.[1]

2.1. Princip transformátoru

Při vysvětlení činnosti skutečného transformátoru vyjdeme z principu ideálního transformátoru. Tudiž máme uzavřený magnetický obvod s dvěma vinutími. A pro tento obvod platí, že celkové ztráty, činné odpory vinutí a rozptyl, je nulový. Dále také musí magnetický tok procházet jak sekundárním, tak primárním vinutím.

Na primární vinutí připojíme střídavé napětí o okamžité hodnotě U_1 , to zapříčiní, že vinutím začne procházet proud I_1 který vytvoří magnetický tok Φ_1 . Díky tomu se na základě indukčního zákona v sekundárním vinutí indukuje napětí U_2 , které je závislé na kmitočtu primárního napětí U_1 a maximálním indukčním toku Φ_m . Následné zatížení sekundární cívky zátěží R zapříčiní, že sekundárním vinutím začne procházet proud o okamžité hodnotě I_2 . Takový obvod je definovaný jediným parametrem, a tím je převod transformátoru K , který bude definován v následující kapitole. [2]

2.2. Převod transformátoru

„Převod transformátoru definujeme jako podíl indukovaných napětí na primárním a sekundárním vinutí. Pro ideální transformátor platí, že ztráty se rovnají nule a současně má nekonečně velkou magnetickou vodivost, tedy i rozptyly magnetických toků jsou nulové“, tudíž můžeme psát. [2]

$$U_1 = U_{in1} = \sqrt{2}\pi f \Phi N_1 \quad [V] \quad (2.1)$$

$$U_2 = U_{in2} = \sqrt{2}\pi f \Phi N_2 \quad [V] \quad (2.2)$$

Ze vztahu (2.1) a (2.2) je jasné, že převod transformátoru je roven poměru napětí, které je rovno poměru počtu primárních závitů k počtu sekundárních závitů (2.3).

$$K = \frac{U_{in1}}{U_{in2}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad [-; V] \quad (2.3)$$

U ideálního transformátoru je vazební reaktance nekonečně velká, tedy magnetizační proud, který teče cívkou je nulový, a i zde musí platit princip superpozice.

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 = 0 \quad [A] \quad (2.4)$$

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad [A] \quad (2.5)$$

Okamžitá hodnota proudu na sekundární straně I_2 směřuje proti okamžité hodnotě I_1 (5). A z tohoto tvaru následně získáme proudový přenos, který nám říká, že proudy se přepočtou nepřímo úměrně počtu závitů primárního a sekundárního vinutí.[2]

$$K = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad [-; A] \quad (2.6)[2]$$

2.3. Účinnost

Oproti ztrátám naprázdno a nakrátko účinnost není údaj, který by byl vždy garantovaný výrobcem, a to z důvodu, že účinnost se mění v závislosti na $\cos\varphi$. Pokud je $\cos\varphi$ definovaný, většinou se udává hodnota 0,8. [3]

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad [\%; W] \quad (2.7)$$

Kde:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 \quad [W] \quad (2.8)$$

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2 \quad [W] \quad (2.9)[3]$$

2.4. Přístrojové transformátory

Podle typu přístroje zapojeného do sekundárního obvodu se tyto transformátory dělí na měřicí a jistící. V našem případě se ale stačí zabývat pouze měřicími transformátory.

Tyto transformátory se používají ke zvýšení rozsahu měřicích přístrojů. Zvýšení je potřeba, jelikož v elektrických sítích se vyskytují hodnoty daleko přesahující rozsah měřicích přístrojů. Proto potřebujeme tyto hodnoty proudu nebo napětí transformovat na hodnoty vhodné pro měření a k tomu používáme měřicí transformátory. Měřicí transformátory musí být přesné v okolí jmenovitých hodnot, ale u přechodových stavů není taková přesnost vyžadována. [4][5]

2.4.1. Měřicí transformátory proudu

Proudové transformátory fungují na principu Faradayova indukčního zákona elektromagnetické indukce a bývají napájeny proudovými systémy měřicích přístrojů. Pomocí feromagnetického jádra je zesílená magnetická vazba mezi primárním a sekundárním vinutím, toto je zapotřebí k dosažení potřebné úrovně výstupního signálu. [4]

Feromagnetické jádro je příčinou několika negativních vlastností, které však v běžném provozu mohou být vhodnou konstrukcí transformátoru odstraněna. Primární vinutí je zapojeno do série s obvodem, jehož proud se transformuje do obvodu sekundárního, tzn. připojených měřicích přístrojů. Proto jsou jejich vlastnosti charakteristické vlastnostem sériových transformátorů. Musíme si také dávat pozor, aby celková impedance připojených přístrojů nepřekročila štitkovou hodnotu impedance transformátoru. Transformační poměr je klasický dán poměrem primárního vinutí N_1 ku sekundárnímu vinutí N_2 . To samé platí i pro primární a sekundární proudy. Zátěž transformátoru, neboli jinak také zdánlivý výkon spotřebovaný břemenem definujeme jako: [4][5]

$$P = U_2 \cdot I_2 = Z \cdot I_2^2 \quad [VA; V; A] \quad (2.10)$$

Břemeno proudu je vyjádřeno jako impedance připojených přístrojů a přívodu od transformátoru k nim.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad [\Omega] \quad (2.11)[4]$$

Chybu měřicího transformátoru proudu definujeme podle Tabulka 1. Třídy přesnosti transformátoru [15]Tabulka 1

Tabulka 1. Třídy přesnosti transformátoru [15]

| Prim. proud v % I _{1n} | Třídy přesnosti měřicích transformátorů proudu | | | | | | | | | |
|--|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 0,1 | | 0,2 | | 0,5 | | 1 | | 3 | |
| | Dovolené chyby proudu δ _i a úhlu δ _φ | | | | | | | | | |
| | δ _i | δ _φ | δ _i | δ _φ | δ _i | δ _φ | δ _i | δ _φ | δ _i | δ _φ |
| | % | min | % | min | % | min | % | min | % | min |
| 10 | 0,25 | 10 | 0,5 | 20 | 1 | 60 | 2 | 120 | | |
| 20 | 0,2 | 8 | 0,35 | 15 | 0,75 | 45 | 1,5 | 90 | | |
| 100 | 0,1 | 5 | 0,2 | 10 | 0,5 | 30 | 1 | 60 | 3 | |
| 120 | 0,1 | 5 | 0,2 | 10 | 0,5 | 30 | 1 | 60 | 3 | |

2.4.2. Měřicí transformátory napětí

Napětíové transformátory bývají napájeny napětíovými systémy měřicích přístrojů. Primární vinutí je zapojené paralelně s obvodem, jehož napětí se transformuje do obvodu sekundárního. Proto jsou jejich vlastnosti charakteristické vlastnostem výkonových transformátorů. Poměr primárního a sekundárního počtu závitů je roven poměru primárního a sekundárního napětí, ale proudy v obou vinutí závisí na zátěži odebírané na sekundárních svorkách a na budícím příkonu.

Měřicí transformátory mají pracovat blízko stavu naprázdno, tzn. k sekundárním svorkám je připojen velký odpor proto, aby nedošlo ke zkratu. Stejně, jako u proudových transformátorů, napětíové způsobují chybu převodu a fáze. [5]

3. Chyby měření

Při zjišťování velikosti požadované veličiny dochází k různým chybám, které ovlivňují výsledek měření. Proto nikdy nejsme schopni měřením získat stoprocentně správnou hodnotu naměřené veličiny, což má za následek, že skutečná a měřená hodnota jsou dvě rozdílné hodnoty. Tyto chyby následně zapisujeme pomocí těchto dvou způsobů:

- **Absolutní chyba** – tato chyba je zapsána jako rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou. Používá se k vyhodnocování výsledků měření, ale jelikož se uvádí v jednotkách měřené veličiny přesnost měření moc dobře nevyjadřuje, a proto se spíše používá jen k výpočtu chyby relativní.

$$\Delta X = X_M - X_S \quad [-] \quad (2.12)$$

- **Relativní chyba** – je poměr absolutní chyby ke skutečné hodnotě většinou vynásobena stem. Díky tomu je chyba uváděna v procentech a dobře nám vyjadřuje výslednou chybu měření. Proto je určena k porovnávání přesnosti různých měřících metod. [5]

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_S} * 100 \quad [\%] \quad (2.13)[5]$$

3.1. Dělení chyb

Podle původu:

- **Hrubé chyby** – tyto chyby většinou vznikají špatným odečtením hodnot z přístroje nebo jeho poruchou. Od ostatních naměřených hodnot se zásadně liší. Z měření se tato chyba vylučuje.
- **Systematické chyby** – jedná se o chybu která vzniká v důsledku použité metody nebo přístroje. Většinou se pravidelně opakují a jejich relativní chyba bývá stejná. Ve většině případů se dá chyba zjistit, následně odhadnout a z měření ji tím eliminovat.
- **Náhodné chyby** – nepravidelně se opakující chyby u kterých nejsme schopni zjistit jejich původ. Způsobeny velkým počtem náhodných vlivů. Můžeme je eliminovat opakovaným měřením a vypočtením aritmetického průměru z hodnot. Příklady náhodných vlivů:
 - *Vliv teploty* – každý přístroj má daný stanovený rozsah teploty při kterém je zaručena třída přesnosti. Pokud je teplota přístroje mimo tento rozsah, třída přesnosti se snižuje.
 - *Vliv vlhkosti* – ta se projeví změnou hodnot izolačního odporu.
 - *Mechanické vlivy* – nejvíce se projevuje jako tření v ložiscích. Nepříznivě taky na výsledek měření působí otřesy, vibrace a nesprávná poloha přístroje.
 - *Vliv vnějšího elektromagnetického pole* – vnější pole působící na přístroje se slabým vlastním polem. Pomocí stínění měřicího ustrojí se dá těmto vlivům bránit. [5]

Podle vzniku:

- **Chyba metody** – vzniká nezahrnutím všech známých vlivů do výpočtu měřené veličiny. Mezi tyto vlivy patří např. spotřeba přístroje, zjednodušení výpočtu nebo zjednodušení zapojení přístroje. Jedná se o chybu systematickou a jako takovou chybu ji lze vypočítat a opravit.
- **Chyba měřicího přístroje** – jsou důsledkem nedokonalostí měřicích přístrojů. Většinou to jsou dovozené chyby přístrojů, které jsou udávány třídou přesnosti stanovenou výrobcem. Tuto chybu nelze opravou zcela vyloučit, a proto ji uvádíme v mezích, v nichž leží skutečná hodnota měřené veličiny, např. $5 \pm 0,5$.
- **Chyba obsluhy** – chyby, za které může obsluha přístroje, jako je špatně zvolená metoda, chybné výpočty nebo špatné odečtení hodnot, které se ale v důsledku chyb přístroje často zanedbává. [5]

4. LabVIEW

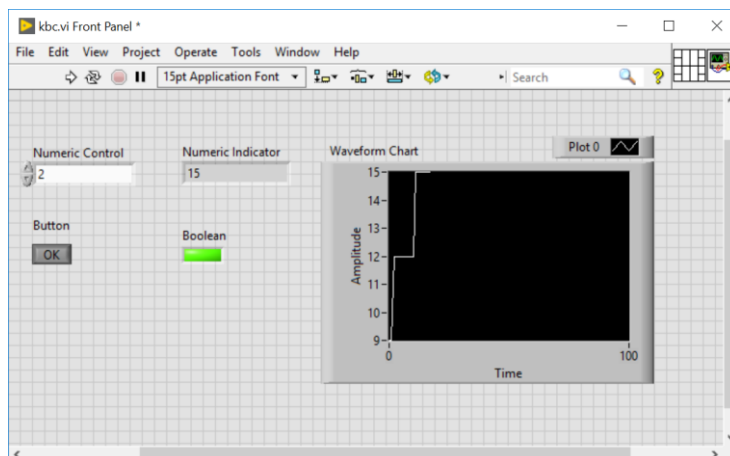
„Programovací a vývojové prostředí LabVIEW (z angl. Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench), čili laboratorní pracoviště virtuálních přístrojů, je produktem americké firmy National Instruments (NI), která je průkopníkem v oblasti virtuální instrumentace, technické disciplíny, která zažívá velký rozvoj v oblasti vývoje, výzkumu, školství a průmyslu.“ [6]

Toto vývojové prostředí je označováno za grafické, jelikož na místo textového kódu užívá pro tvorbu programu ikony. Takovýto programovací jazyk nazýváme G-jazyk a poskytuje uživateli všechny datové a programovací struktury v grafické podobě. Takovéto prostředí je vhodné pro měření a analýzu signálu, řízení a vizualizaci technologických procesů a k programování složitých systémů. Také disponuje knihovnami pro tvorbu aplikací v oblasti měření a všech jeho fázích (tzn. sběru, analýzy a prezentace dat).

Produktem takovéhoho prostředí je Virtuální instrument/přístroj neboli také VI. Toto uživatelem vytvořené VI se svým vzhledem a funkcí podobá reálnému přístroji. Výsledné VI, které dostane koncový uživatel je díky grafickému prostředí velmi přehledné a snadnou úpravou programu lze docílit specifických změn (např. regulace, měření, řízení atd). Na rozdíl od reálných přístrojů, které často bývají jak finančně, tak časově náročné a podobné úpravy u nich nebývají možné. [6][7]

4.1. Rozdělení VI

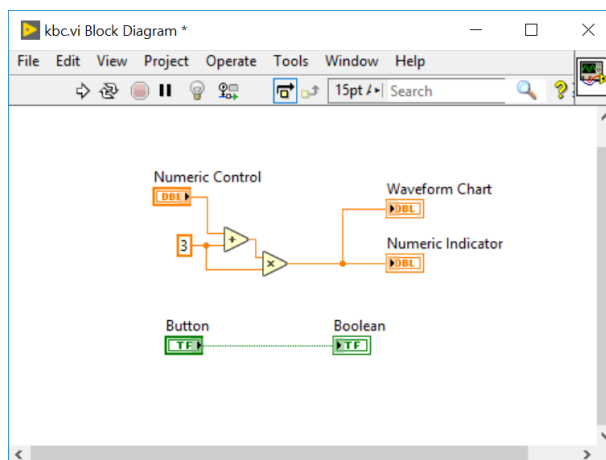
Čelní panel – tvoří uživatelské rozhraní aplikace a simuluje čelní panel reálného přístroje. Přes ovládací a indikační prvky na tomto panelu je možné řídit chod celé aplikace (tzn. zadávání parametrů měření, získávání dat a zpracování výsledků). Ovládací prvky čelního panelu představují vstupní prvky reálného přístroje, jako jsou knoflíky, tlačítka a další prvky pro zadání informace. Indikační prvky čelního panelu zase realizují výstupní prvky zařízení k přenosu dat, jako jsou LED diody, grafy atd. [6][7]



Obrázek 1. Příklad čelního panelu

Blokový diagram – je zdrojový kód celé aplikace znázorněný v grafické podobě a řídí činnost celého virtuálního instrumentu. Takovýto blokový diagram můžeme dále dělit na:

- **Uzel** – ve kterém se provádí program. Uzel lze rozdělit na tři typy. Prvním je funkce, to jsou aritmetické operace (např. sčítání, odčítání, atd). Dalším jsou struktury, které řídí chod programu (např. smyčky while a for). Posledním je SubVI, to je VI, který je jako podprogram použitý v jiném VI.
- **Terminál** – reprezentuje v ikonách ovládací a indikační prvky nacházející se na čelním panelu. Tyto ikony podle použití obsahují vstupní/výstupní připojovací body, které lze propojit pomocí tzv. spoje.
- **Spoj** – vytváří cestu dat mezi terminály a uzly. Spoje mohou být podle proměnné různého datového typu a v závislosti na typu mají spoje různou barvu (např. Boolean = zelená, Double = oranžová). Pokud datový typ spoje a terminálů nesouhlasí, nelze je k sobě připojit.



Obrázek 2. Příklad blokového diagramu

Konektor a Ikona – VI může být použito i jako tzv. SubVI. A aby bylo takovéto SubVI možné použít, musí mít ikonu, která ho bude reprezentovat v blokovém diagramu. Takováto ikona lze libovolně nastavit. Následně musí být pro SubVI definovaný i konektor. Což je v podstatě skupina terminálů, které jsou napojeny na prvky z čelního panelu. [6][7]



Obrázek 3. Ikony a terminál SubVI

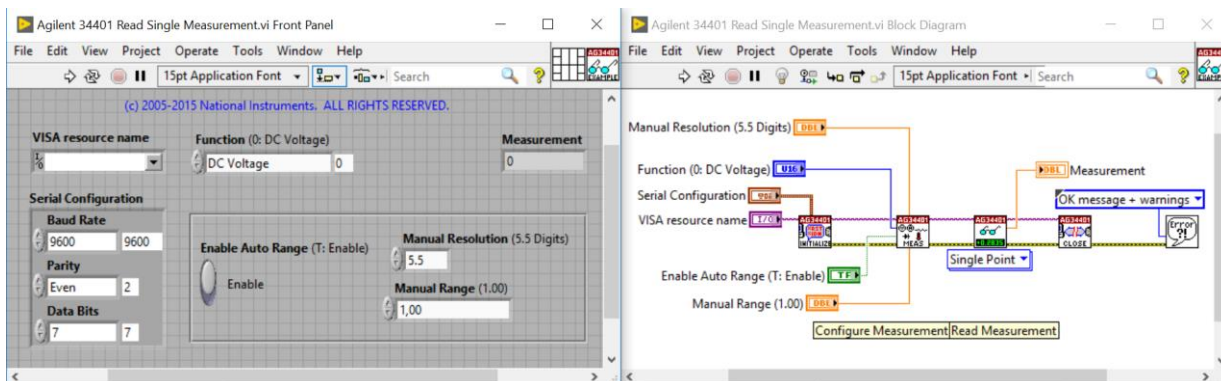
4.2. Přístrojové ovladače

Přístrojové ovladače v LabVIEW reprezentují funkce přístroje jako sady virtuálních přístrojů. Tyto VI komunikují s přístrojem a každé z nich reprezentuje určitou prováděnou operaci, kterou chceme, aby přístroj provedl (např. konfigurace měření, čtení dat atd.). Jsou to v základu softwarové soubory neboli SubVI sloužící k zjednodušenému ovládní programovatelného přístroje.

Díky těmto přístrojovým ovladačům dokážeme výrazně zredukovat čas, který je potřeba k vytvoření programu, jelikož eliminují potřebu naučit se souhrnné programovací příkazy pro každý přístroj.

Většina těchto ovladačů je volně ke stažení na stránkách firmy National Instruments. Následným nainstalováním je ovladač připraven k použití. Ovladač se nachází v paletě nástrojů, v záložce Instrument I/O, k okamžitému použití.

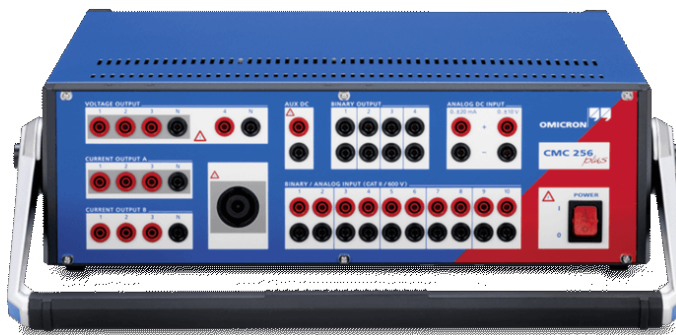
Mnoho přístrojových ovladačů má i tzv. VI Tree, které slouží k prohlédnutí celé struktury daného ovladače. Dále také nabízejí pomoc v podobě již před vytvořených příkladů pro práci s jednotlivými VI ovladače. Na Obrázek 4. můžeme vidět takto vytvořený příklad pro ovladač přístroje Agilent 34401, který nám ukazuje, jak nakonfigurovat měření a získat jedno čtení dat. [8]



Obrázek 4. Čelní panel a blokový diagram přístrojového ovladače

5. OMICRON CMC 256plus

Testovací zařízení OMICRON CMC 256plus je zařízení, které slouží k testování ochranných relé, elektroměrů, měničů a měřicí převodníku. Není to však jen zkušební sada pro testování, ale také univerzální kalibrátor. Jeho vysoká přesnost nám dovoluje, kalibrovat velké spektrum měřících přístrojů, včetně elektroměrů třídy 0.2, jako jsou zařízení měřící kvalitu napájení, měřicí převodníky a fázové měřicí jednotky. [9]



Obrázek 5. Kalibrátor OMICRON CMC256plus [9]

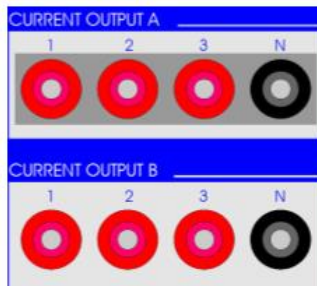
Testovací systém OMICRON CMC 256plus není jenom fyzické zařízení, ale také se skládá i z testovacího softwaru OMICRON Test Universe pro PC, pomocí kterého se fyzické zařízení ovládá. Propojení mezi PC a přístrojem je docíleno pomocí Ethernetového kabelu. [9]

5.1. Přední panel

Jak lze vidět na Obrázek 5., na předním panelu testeru OMICRON CMC 256plus se nachází velké množství různých vstupů a výstupů.

- Stejnoseměrný výstup napětí (0–264 V)
- Stejnoseměrné měřicí vstupy (0–10 V, 0–20 mA)
- Napěťové výstupy
- Proudové výstupy
- Binární/Analogové vstupy
- Binární výstupy

5.1.1. Proudové výstupy



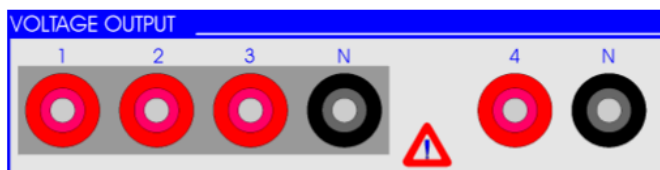
Obrázek 6. Proudové výstupy kalibrátoru [10]

Jak lze vidět na Obrázek 6., proudové výstupy jsou děleny do dvou galvanicky oddělených trojic, každá s vlastním nulovým vodičem „N“. Tyto proudové trojice jsou taky galvanicky odděleny od všech ostatních konektorů CMC 256plus.

Proudové zesilovače jsou implementovány jako lineární zesilovače se stejnosměrnou vazbou. S touto vazbou může být jakýkoliv přechodový děj nebo stejnosměrný posun precizně reprodukován. Proudové výstupy jsou vybaveny třemi proudovými rozsahy, aby bylo možné zvýšit jejich dynamický rozsah. [10]

- Rozsah 1: 6 x 12.5 A
- Rozsah 2: 3 x 25 A
- Rozsah 3: 1 x 75

5.1.2. Napěťové výstupy



Obrázek 7. Napěťové výstupy kalibrátoru [10]

Jak lze vidět na Obrázek 7., čtyři napěťové výstupy mají společný nulový vodič a jsou galvanicky odděleny od všech dalších výstup. Oba výstupy, značené „N“ jsou na stejném potenciálu a jsou taktéž galvanicky odděleny od všech ostatních. Napěťové výstupy jsou vybaveny rozsahy.[10]

- Rozsah 1: 4 x 300 V
- Rozsah 2: 1 x 600 V

6. AgilentU3606B

Je zařízení od firmy Keysight, které v sobě kombinuje dva moduly. Prvním z nich je 30 W jednokanálový generátor stejnosměrného proudu s generátorem čtvercového signálu a druhým z modulů je $5^{1/2}$ místný multimetr. Oba tyto moduly mohou běžet souběžně, takže zařízení lze používat zároveň jako zdroj tak i multimetr.[11]



Obrázek 8. Multimetr AgilentU3606B [13]

Jak je vidět na Obrázek 8., přední panel jako takový, nám umožňuje ovládat široké spektrum funkcí, jako je nastavení parametrů měření, výstupních parametrů, ochranných prvků a nastavení samotného zařízení. Zadní panel pak mimo konektoru napájení obsahuje také GPIB a USB konektory. Díky těmto konektorům lze přístroj připojit ke vzdálené periférii, nejčastěji to bývá počítač, z něhož je pak možné provádět měření nebo získaná data posílat do počítače.

Mimo základní vlastnosti, jako je měření proudu a napětí (AC, DC, AC+DC), multimetr umožňuje také měření odporu jak vysokého (do 100 MΩ), tak nízkého (100mΩ – 10 Ω). Dále také umožňuje měření kapacity, frekvence a šířky pulzu. Následně ještě nabízí použití osmi matematických operací.[11]

6.1. Specifikace digitálního multimetru

Tyto specifikace vcházejí v platnost za předpokladu, že:

- Specifikace začínají až po zahřátí multimetru, což je 60 minut a při použití rozlišení $5^{1/2}$ digitu.
- Provozní teplota od 18 °C do 28 °C.
- Přesnost je zobrazena jako \pm (% z výsledku + % z rozsahu).
- Pro teplotu 0 °C do 18 °C a 28 °C do 55 °C, se používá tento teplotní koeficient:
[0.1 · (aplikovaná přesnost) / °C]

| Function | Range | Frequency range | 24 Hour 23 °C ± 1 °C | 90 Days 23 °C ± 5 °C | 1 Year 23 °C ± 5 °C | Temperature coefficient 0 °C to 18 °C 28 °C to 55 °C |
|------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|---|
| True rms AC voltage | 100.000 mV to 750.00 V | 20 Hz to 45 Hz | 0.60 + 0.1 | 0.60 + 0.1 | 1.00 + 0.1 | 0.02 + 0.02 |
| | | 45 Hz to 10 kHz | 0.16 + 0.1 | 0.16 + 0.1 | 0.20 + 0.1 | 0.02 + 0.02 |
| | | 10 kHz to 30 kHz | 0.80 + 0.1 | 0.80 + 0.1 | 1.00 + 0.1 | 0.02 + 0.02 |
| | | 30 kHz to 100 kHz | 3.00 + 0.2 | 3.00 + 0.2 | 3.00 + 0.2 | 0.05 + 0.02 |
| True rms AC current | 10.0000 mA to 3.0000 A | 20 Hz to 45 Hz | 0.80 + 0.1 | 0.80 + 0.1 | 1.50 + 0.1 | 0.02 + 0.02 |
| | | 45 Hz to 1 kHz | 0.40 + 0.1 | 0.40 + 0.1 | 0.50 + 0.1 | 0.02 + 0.02 |
| | | 1 kHz to 10 kHz | 2.00 + 0.2 | 2.00 + 0.2 | 2.00 + 0.2 | 0.02 + 0.02 |

Obrázek 9. Přesnost multimetru AgilentU3606B [11]

7. YOKOGAWA WT230

Je třífázový digitální wattmetr s vysokou přesností, díky čemuž může měřit stejnosměrné a střídavé signály od 0,5 Hz až do 100 kHz, se základní přesností 0,2 %. YOKOGAWA WT230 je wattmetr s bohatou škálou funkcí, nabízí jak měření efektivní hodnoty proudu a napětí, tak měření činného výkonu a také měření hodnot „peaků“ proudu a napětí. Wattmetr mimo jiné disponuje širokým rozsahem napětí (15 V–600 V), proudu (0,25 A–20 A) a také filtry pro eliminaci šumu.[12]



Obrázek 10. Wattmetr YokogawaWT230 [14]

Jak můžeme vidět na Obrázek 10., přední panel wattmetr obsahuje tři sedmi – segmentové displeje a vše potřebné pro nastavení měření. Na zadním panelu pak najdeme konektor napájení, terminály pro vstupy proudu a napětí, vstup pro připojení externího senzoru a také GPIB a SERIAL konektory pro připojení k vzdálené periférii.[12]

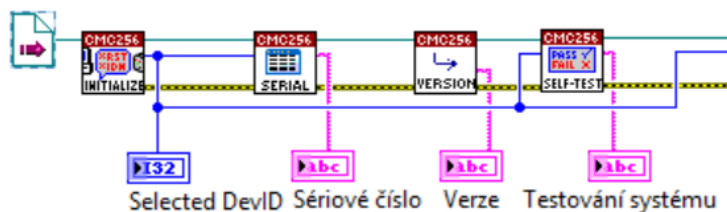
8. Tvorba aplikace

Jelikož se má práce v podstatě skládat ze dvou měření, bylo třeba nutně vytvořit pro každé měření samostatnou aplikaci v prostředí LabVIEW. Hlavním cílem obou aplikací byla komunikace a generování proudu pomocí kalibrátoru Omicron CMC256plus. První aplikace následně měla vypočítat chybu proudového měřicího transformátoru TL20 v závislosti na zátěži v sekundárním obvodu. Tato zátěž byla realizována v podobě laboratorních wattmetrů Metra. Druhá aplikace pak měla za úkol měřit vliv polohy vodiče na chybu proudových kleští MN39. Podrobné fungování aplikací bude vysvětleno v následujících kapitolách.

8.1. Komunikace s kalibrátorem OMICRON CMC256plus

Pro jakoukoliv komunikaci se samotným přístrojem bylo zapotřebí propojení aplikace a přístroje pomocí přístrojových driverů. Tyto a většina přístrojových driverů jsou volně ke stažení z webových stránek firmy National Instruments. Nejprve bylo zapotřebí vložit driver pro inicializaci komunikace a také pro spolehlivou práci přístroje a s pomocí dalších driverů otestovat systém, zda funguje, jak má. Toho bylo docíleno pomocí těchto driverů:

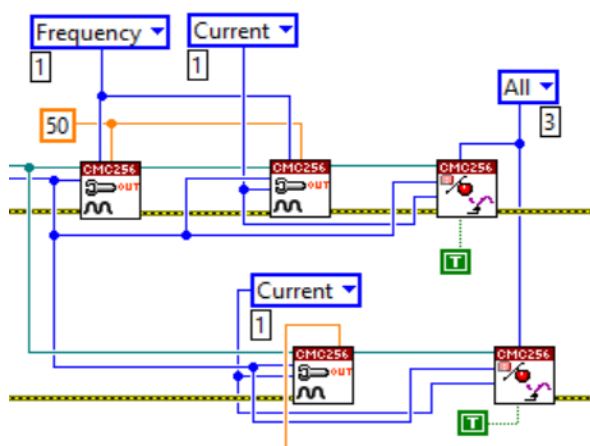
- **Initialize** – zřizuje komunikaci mezi programem a přístrojem
- **Serial Number** – zjišťuje sériové číslo přístroje
- **Version** – zjišťuje verzi driveru
- **Self Test** – proběhne otestování systému



Obrázek 11. Inicializace systémů kalibrátoru

Následně bylo zapotřebí implementovat do programu drivery pro generování analogových parametrů. Jelikož jsme měřili střídavý proud, bylo zapotřebí nastavit i frekvenci. Frekvence byla zvolena na 50 Hz, jelikož při ní kalibrátor pracuje nejspolehlivěji. Poté bylo zapotřebí inicializovat driver pro nastavování parametrů proudu a nastavit také, analogové výstupy pro všechny tři fáze.

- **Configure Analog Parameters** – konfigurace vstupních parametrů
- **Enable Analog Output** – zpřístupní analogové výstupy
- **Close** – ukončuje spojení



Obrázek 12. Nastavení parametrů pro proud a frekvenci

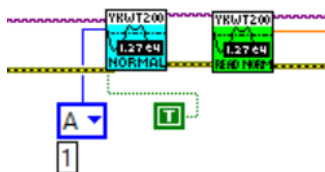
8.2. Komunikace s YokogawaWT230 a AgilentU3606B

U tohoto wattmetru vypadalo použití přístrojových driverů obdobně jako u kalibrátoru OMICRON CMC256plus. Nejprve byly použity drivery pro inicializaci spojení a otestování systému, zda je vše v pořádku. U inicializace bylo zapotřebí ještě nastavit tzv. VISA Resource Name, pro správné propojení přístroje a aplikace.



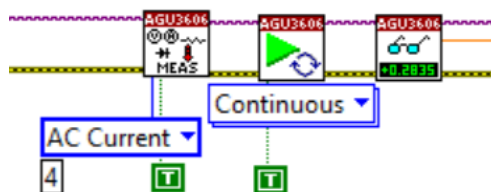
Obrázek 13. Inicializace systémů wattmetru

Poté již stačilo inicializovat přístrojové drivery pro konfiguraci měření (nutno nastavit na měření proudu) a vyčtení výsledných hodnot měření. Následně bylo zapotřebí přidat drivery pro reset přístroje a ukončení komunikace.



Obrázek 14. Nastavení vyčítání měřených hodnot

U multimetru AgilentU3606B složení přístrojových bloků fungovalo obdobně, akorát zde musel být přidán přístrojový driver, který zaručoval nepřetržité a plynulé měření. Na Obrázek 15. přístrojový driver uprostřed.



Obrázek 15. Nastavení nepřetržitého měření

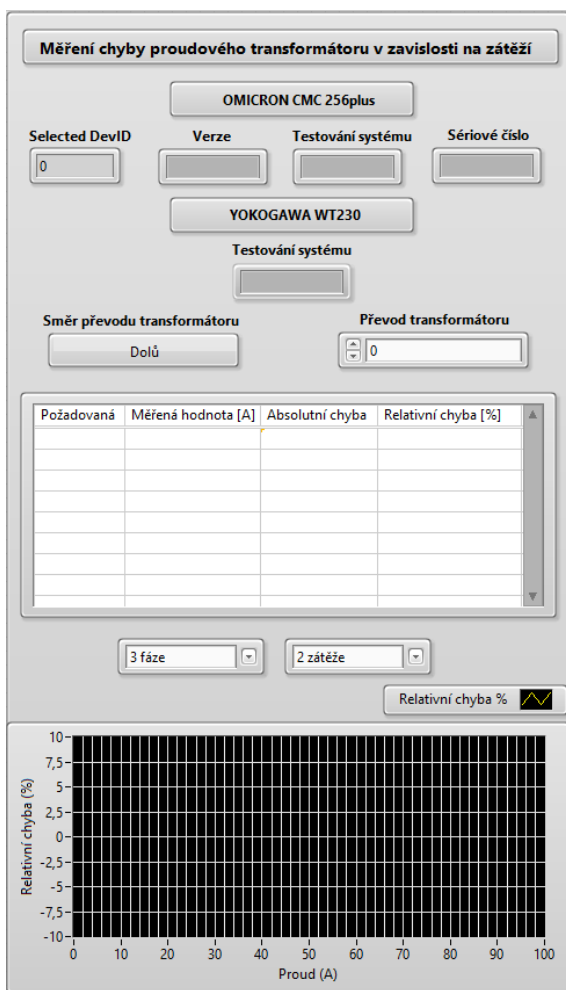
8.3. Přední panel

Pro lepší orientaci mezi mými aplikacemi bych rád v úvodu této kapitoly definoval tyto názvy.

- **Aplikace1** – aplikace pro měření chyby transformátoru v závislosti na zátěži.
- **Aplikace2** – aplikace vlivu polohy vodiče na chyby při měření proudovými kleštěmi.

8.3.1. Přední panel Aplikace1 (závislost na zátěži)

Jak lze vidět na Obrázek 16. na předním panelu není třeba nic nastavovat, program funguje plně automaticky. Tedy, kromě nastavení směru a hodnoty převodu transformátoru, což ale slouží jen ke správnému výpočtu chyb. Horní strana panelu patří inicializačním a testovacím prvkům systému. Prostřední zase výstupním hodnotám z měření a úplně dole ve waveform grafu se vykresluje křivka relativní chyby, v závislosti na nastavovaném proudu.



Obrázek 16. Přední panel (Aplikace1)

8.3.2. Přední panel Aplikace2 (Závislost na poloze vodiče)

Přední panel pro aplikace2 Obrázek 17. je obdobný jako u aplikace1. Změnou tady však je, že pro toto měření je třeba nastavit vstupní parametry. Je tedy nutno zvolit, zda referenční proud má být zadán nebo změřen a také se zde volí poloha, ve které se měřený vodič nachází a samozřejmě také proud, který vodičem prochází. Následně jsou tabulky pro výsledné hodnoty uloženy na předním panelu tak, aby odpovídaly té poloze vodiče, pro kterou jsou určeny (např poloha vodiče vlevo rovná se levá tabulka na předním panelu). Následně po vykonání všech měření je zde tlačítko stop, které ukončí chod aplikace.

Vliv polohy vodiče na chybu při měření proudovými kleštěmi


Nastavit proud

Poloza vodiče

| Požadovaná | Měřená hodnota [A] | Absolutní | Relativní chyba [%] |
|------------|--------------------|-----------|---------------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Zadej referenční hodnotu

Změř referenční hodnotu



| Požadovaná | Měřená hodnota [A] | Absolutní | Relativní chyba [%] |
|------------|--------------------|-----------|---------------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

| Požadovaná | Měřená hodnota [A] | Absolutní | Relativní chyba [%] |
|------------|--------------------|-----------|---------------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

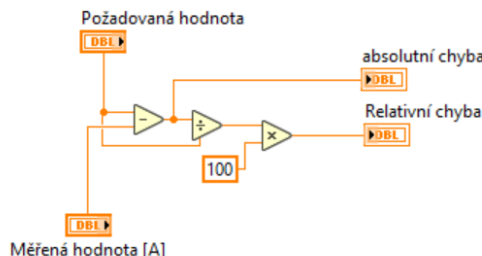
 STOP

Obrázek 17. Přední panel (Aplikace2)

8.4. Princip aplikace

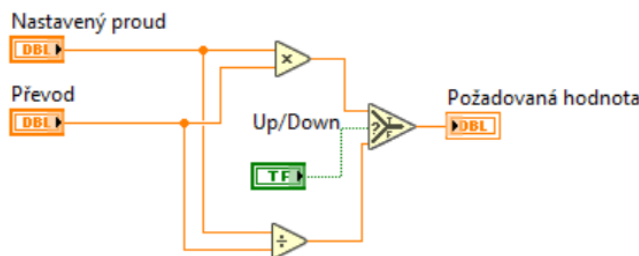
8.4.1 Aplikace1 (závislost na zátěži)

Hlavním cílem této aplikace bylo změření chyby proudového transformátoru v závislosti na zátěži na sekundárním obvodu. Samotný výpočet chyby nebyl nějak složitý, šlo pouze o výpočet absolutní chyby a relativní chyby, následně pro větší kvalitu výsledků byla vypočtena i nejistota měření.



Obrázek 18. SubVI pro výpočet chyb

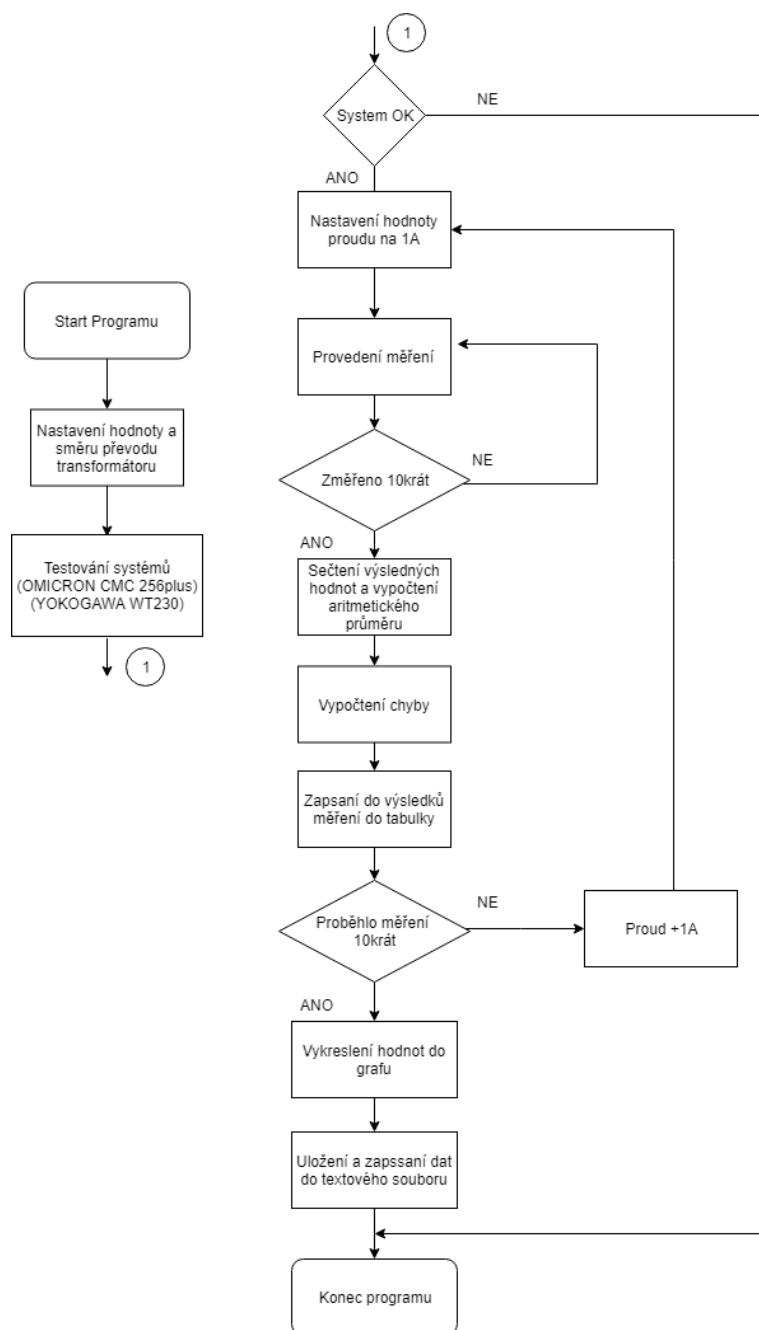
Po spuštění aplikace se systém otestoval, zda přístroje fungují jak mají a zda jsou správně k aplikaci připojeny. Následně se na kalibrátoru nastavila hodnota 1 A, která je pomocí transformátoru transformována na požadovanou hodnotu.



Obrázek 19. Transformace proudu uvnitř aplikace

Tato hodnota byla v rámci jedné smyčky změřena 10x a následně z těchto deseti hodnot byla vypočtena střední hodnota a směrodatná odchylka, dále pomocí těchto hodnot byla vypočtena rozšířená nejistota měření, která byla připočtena ke střední hodnotě. Díky tomu jsme docílili co nejpřesnějšího výsledku měření. Poté je výsledná hodnota poslána do SubVI, ve kterém proběhne vypočtení absolutní a relativní chyby. Pak jsou chyby s veškerými potřebnými hodnotami zapsány do tabulky. Následně se k nastavené hodnotě přičte hodnota +1 a ta je pomocí shift registru přenesena do další iterace smyčky. Takto se měření opakuje ještě 10x, jelikož měřený proudový rozsah je od 1-10 A. Po změření všech požadovaných hodnot a vypočtení chyb, jsou výsledné hodnoty přeneseny do grafu a zároveň uloženy do vytvořeného souboru typu CSV. Dále je pomocí přístrojových driverů přerušeno spojení s přístroji a program je ukončen.

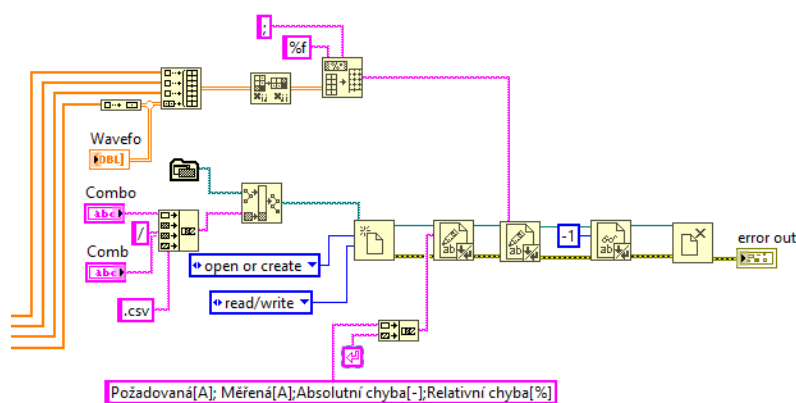
Jelikož testování jednotlivých systému jak kalibrátoru, tak wattmetru trvalo různě dlouhou dobu, stávalo se, že kalibrátor už posílal generovaný proud a wattmetr ještě prováděl testování. Tudíž docházelo k chybovým stavům. Toto jsem vyřešil použitím „Flat sequence“ která nám rozdělila program do tří sub diagramů a to „Inicialization“, „Main Program“, „Close“. Díky tomu nemůže začít další část programu, dokud nebudou ukončeny všechny procesy v diagramu předešlém. Díky tomu se vyvarujeme předbíhání jednotlivých částí programu. Cely blokový diagram bude obsažen v příloze této práce.



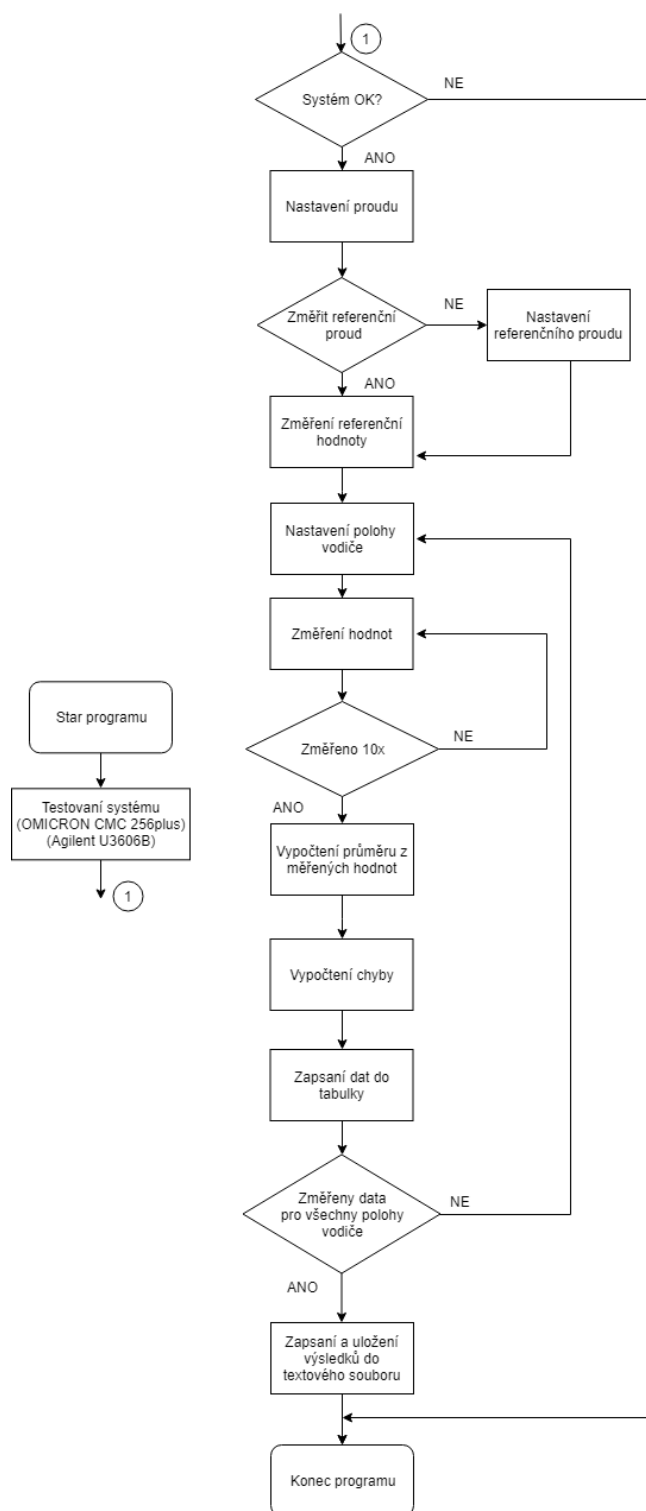
Obrázek 20. Vývojový diagram (Aplikace1)

8.4.2. Aplikace2 (závislost na poloze vodiče)

Aplikace2 fungovala obdobě jako aplikace1. Před startem programu bylo zapotřebí na předním panelu zadat všechny požadované hodnoty. Po tomto nastavení bylo možné program spustit. Opět se otestovaly všechny systémy, následně byla změřena referenční hodnota, tudíž poloha vodiče ve středu kleští. Poté program provedl 10 měření nastaveného proudu a vypočetl rozšířenou nejistotu měření kvůli přesnější měřené hodnotě. Dále byly hodnoty vypsány do tabulky a buď bylo možné měření opakovat nebo změnit nastavení a provádět měření pro jinou polohu vodiče. Po proměření všech poloh jsem ukončil program zmáčknutím tlačítka stop, díky tomu se nám aplikace ukončila a výsledné hodnoty byly zapsány do CSV souboru, který byl následně uložen do složky obsahující program.



Obrázek 21. Ukládání výsledků do CSV souboru



Obrázek 22. Vývojový diagram (Aplikace2)

9. Nejistoty měření

Jak jsem již zmiňoval, mimo jiné byly vypočítány i nejistoty měření pro kalibrátor OMICRON CMC256plus, pro AgilentU3606B a pro wattmetr YokogawaWT230. Tyto nejistoty následně byly promítnuty do výsledné hodnoty pro zpřesnění měření. Nejprve jsme museli v aplikacích vypočíst střední hodnotu a směrodatnou odchylku. Následně byla vypočtena absolutní chyba přístrojů, ze kterých se posléze vypočetly nejistoty.

Absolutní chyby přístrojů:

- *OMICRON CMC256plus:*

$$\Delta_{OMICRON} = 0,015 \% \text{ of } RDG + 0,005 \% \text{ of } FS \quad [-] \quad (9.1)[9]$$

- *AGILENT U3606B*

$$\Delta_{AGILENT} = 0,5 \% \text{ of } RDG + 0,1 \% \text{ of } FS \quad [-] \quad (9.2)[11]$$

- *YOKOGAWA WT230*

$$\Delta_{YOKOGAWA} = 0,1 \% \text{ of } RDG + 0,1 \% \text{ of } FS \quad [-] \quad (9.3)[12]$$

Nejistoty přístrojů:

- *OMICRON CMC256plus:*

$$u_{BOMICRON} = \frac{\Delta_{OMICRON}}{\sqrt{3}} \quad [-] \quad (9.4)[16]$$

$$u_{COMICRON} = u_{BOMICRON} \quad [-] \quad (9.5)[16]$$

- *AGILENT U3606B & YOKOGAWA WT230*

$$u_{AA\&Y} = SMO \quad [-] \quad (9.6)[17]$$

$$u_{BA\&Y} = \frac{\Delta_{AGILENT}}{\sqrt{3}} \quad [-] \quad (9.7)[16]$$

$$u_{CA\&Y} = \sqrt{u_{AA\&Y}^2 + u_{BA\&Y}^2} \quad [-] \quad (9.8)[16]$$

Následně byly vypočítány celkové nejistoty měření:

$$u_c = \sqrt{u_{COMICRON}^2 + u_{CAGILENT}^2} \quad [-] \quad (9.10)[16]$$

$$u_c = \sqrt{u_{COMICRON}^2 + u_{CYOKOGAWA}^2} \quad [-] \quad (9.11)[16]$$

Tyto nejistoty posléze byly rozšířeny ještě o koeficient $k = 2$. Vzorec pro rozšířenou nejistotu je dle ČSN EN 60 359:

$$u_k = u_c \cdot 2 \quad [-] \quad (9.12)[16]$$

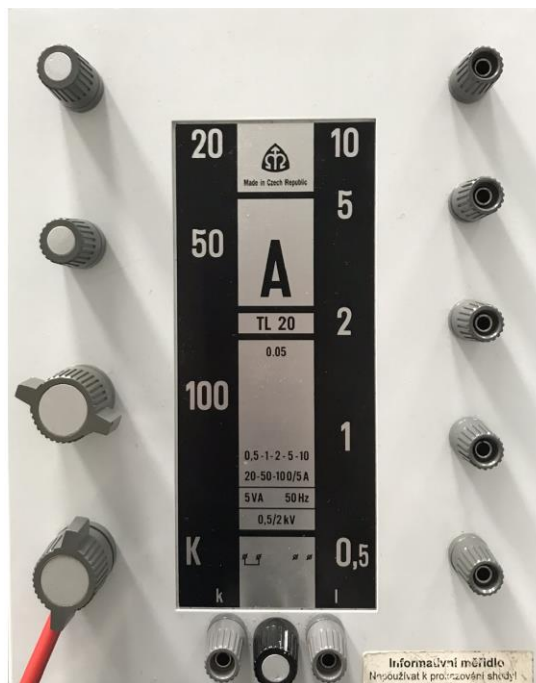
Následně byla střední hodnota připočtena k rozšířené nejistotě. A tato hodnota byla výsledná měřená.

$$\text{Měřená hodnota} = \text{střední hodnota} + u_k \quad [-] \quad (9.11)$$

10. Schéma zapojení a použité přístroje

Mimo již zmíněné měřicí přístroje a kalibrátor byly při měření použity tyto přístroje:

- **Laboratorní měřicí transformátor TL20**



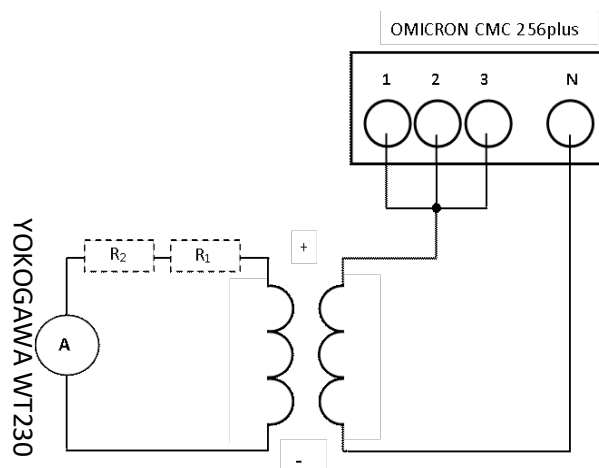
Obrázek 23. Laboratorní transformátor TL20

- *Proudové kleště MN39*



Obrázek 24. Proudové kleště MN39

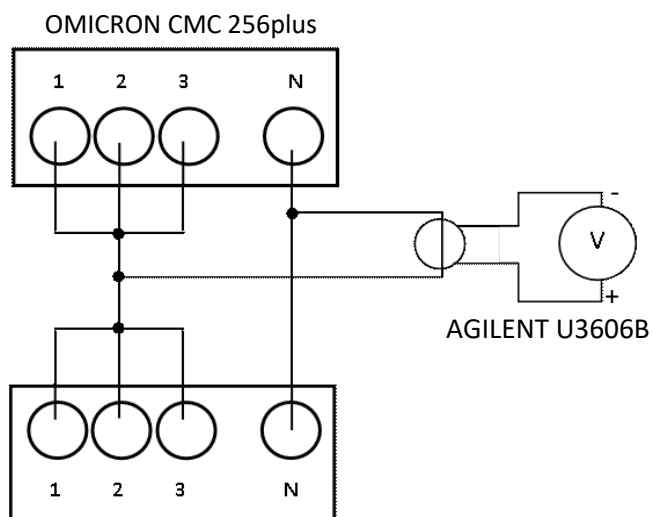
10.1. Schéma zapojení měření chyby zátěže



Obrázek 25. Schéma zapojení (v závislosti na zátěži)

Na Obrázek 25. je vidět schéma zapojení pro měření chyby proudového transformátoru TL20 v závislosti na zátěži v sekundárním obvodu. Jak je možné vidět, pro toto měření jsem využíval jen jednu trojici proudových výstupů kalibrátoru OMICRON CMC 256plus. Tyto proudové výstupy byly spojeny a spolu s jejich nulovým vodičem připojeny k primárnímu obvodu proudovému transformátoru, v závislosti na požadovaném převodu. Následně byly k sekundární obvodu připojeny do série zátěže v podobě wattmetru metra a měřicí přístroj wattmetr YOKOGAWA WT230.

10.2. Schéma zapojení poloha vodiče



Obrázek 26. Schéma zapojení (V závislosti na poloze)

Obrázek 26. znázorňuje schéma zapojení pro měření polohy vodiče. Jak lze vidět, zde používáme obě proudové trojice. Jelikož jsem měřil proud 20 A, bylo třeba všechny proudové výstupy spojit dohromady a to samé jsem udělal i s nulovými vodiči. Následně jsem propojil proudové výstupy s nulovými vodiči, výsledný propojovací vodič byl vodič, pomocí kterého jsem měřil polohu. Tento vodič jsem vložil do proudových kleští MN39, které byly připojeny na multimetr AGILENTU3606B.

11. Naměřené hodnoty a zhodnocení

Po správném nastavení aplikací a správném zapojení bylo možné přistoupit k měření na jednotlivých přístrojích, které měly následující parametry,

Tabulka 2. Nastavení použitých přístrojů

| | |
|------------------------------------|----------|
| Měřicí proudový transformátor TL20 | 10 A/5 A |
| Proudové kleště MN39 | 10 A/1 V |

11.1. Měření v závislosti na zátěži

Při měření v závislosti na zátěži jsme tedy na primární vinutí transformátoru přiváděli proud 1-10 A, následně jsme v průběhu měření přidávali na sekundární obvod transformátoru zátěž. Pomocí aplikace 1 byla pak vypočtena absolutní a relativní chyba z měřených hodnot, tak jak je možné vidět v Tabulka 3. Tato tabulka znázorňuje měřené hodnoty a průběh relativní chyby měřicího transformátoru TL20 při maximální zátěži (tzn. dva laboratorní wattmetry Metra připojeny na sekundární obvod transformátoru).

Tabulka 3. Naměřené hodnoty pro maximální zátěž

| Proud [A] | Transformovaný proud [A] | Měřená hodnota [A] | Absolutní chyba [-] | Relativní chyba [%] |
|-----------|--------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 0,5 | 0,49952 | 0,00048 | 0,096 |
| 2 | 1 | 0,9991 | 0,0009 | 0,09 |
| 3 | 1,5 | 1,4983 | 0,0017 | 0,113333333 |
| 4 | 2 | 1,9976 | 0,0024 | 0,12 |
| 5 | 2,5 | 2,4973 | 0,0027 | 0,108 |
| 6 | 3 | 2,9976 | 0,0024 | 0,08 |
| 7 | 3,5 | 3,4971 | 0,0029 | 0,082857143 |
| 8 | 4 | 3,9966 | 0,0034 | 0,085 |
| 9 | 4,5 | 4,496 | 0,004 | 0,088888889 |
| 10 | 5 | 4,9958 | 0,0042 | 0,084 |

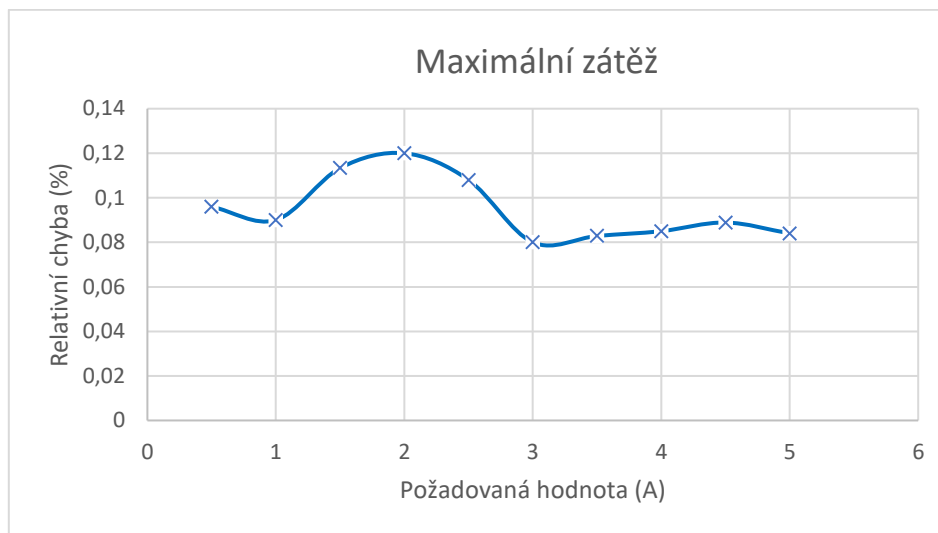
Naměřené výsledky jsem následně zpracoval do grafů pro lepší přehlednost, Obrázek 27. znázorňuje graf relativní chyby bez zátěže a Obrázek 28. graf relativní chyby s maximální zátěží. Ostatní tabulky s naměřenými hodnotami a průběhy jsou obsaženy v příloze.

Jak lze vidět na charakteristikách níže, i charakteristikách obsažených v příloze, všechny křivky jsou nelineární a to znamená, že je nemůžeme proložit jednoduchou lineární funkcí, která by předpovídala jejich chování při dalších proudtech. Z Obrázek 27. vidíme, že relativní chyba se pohybovala okolo 0,03 %, ale v okolí hodnot proudu 1,5 A - 2,5 se chyba prudce zvýšila a to mohlo pravděpodobně být zapříčiněno nějakou vnitřní chybou transformátoru, jelikož se tato odchylka v relativní chybě vyskytla ve všech provedených měřeních. Následně s přidávanou zátěží do sekundárního obvodu transformátoru se relativní chyba zvyšovala, toto je možné vidět na Obrázek 28. Relativní chyba poskočila přibližně o 0,06 %. Tudiž můžeme říct, že čím větší zátěž v sekundárním obvodu, tím bude větší měřená relativní chyba.

Do zvýšení chyby musíme připočítat i chybu způsobenou samotným kalibrátorem a měřicím přístrojem, proto byly vypočteny nejistoty měření, které byly následně promítnuty do výsledků. Výsledné vypočítané hodnoty by se pak daly využít jako korekční tabulka, která by se dala aplikovat do firmware měřicího přístroje k eliminaci těchto chyb.



Obrázek 27. Závislost chyby při měření bez zátěže



Obrázek 28. Závislost chyby s maximální zátěží

11.2. Měření v závislosti na poloze vodiče

Při měření v závislosti na poloze vodiče jsme tedy měnili polohu vodiče v proudových kleštích při konstantních proudech. Proudy byly nastavovány na 1 A, 5 A, 10 A, 15 A, 20 A. Následně pomocí aplikace2 byla opět vypočítaná absolutní a relativní chyba, tyto chyby byly vztahovány k referenční hodnotě, tudíž poloha vodiče ve středu proudových kleští. Výsledné naměřené hodnoty pro 5 A se nachází v Tabulka 4. Zbylé naměřené hodnoty a grafy se nachází v příloze.

Tabulka 4. Měřená chyby v závislosti na poloze vodiče při 5 A

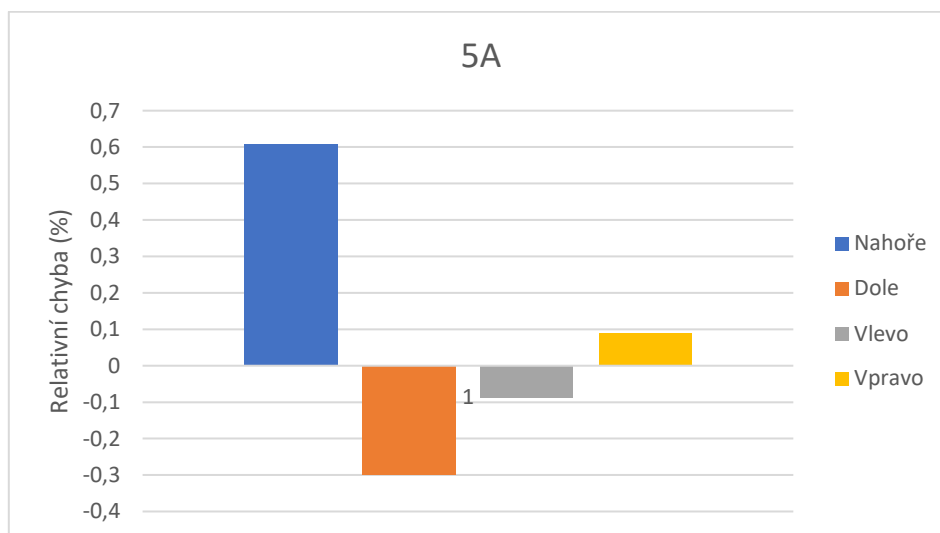
| Proud [A] | Poloha vodiče | Měřený proud [A] | Absolutní chyba [-] | Relativní chyba [-] |
|-----------|---------------|------------------|---------------------|---------------------|
| 5 | Střed | 0,49316 | | |
| | Nahoře | 0,49016 | 0,003 | 0,608321843 |
| | Dole | 0,49463 | -0,00147 | -0,298077703 |
| | Vlevo | 0,49359 | -0,00043 | -0,087192797 |
| | Vpravo | 0,49272 | 0,00044 | 0,089220537 |

Jelikož byla měřena chyba v závislosti na poloze vodiče, byly výsledky pro lepší přehlednost zpracovány pomocí sloupcových grafů. Při všech těchto měřeních se největší chyba vyskytovala v horní poloze. Jak lze vidět na Obrázek 29., relativní chyba v horní poloze byla 0,6 %, pro Obrázek 30. tato chyba byla 0,3 %, tudíž ze zvyšujícím se proudem se tato chyba snižovala.

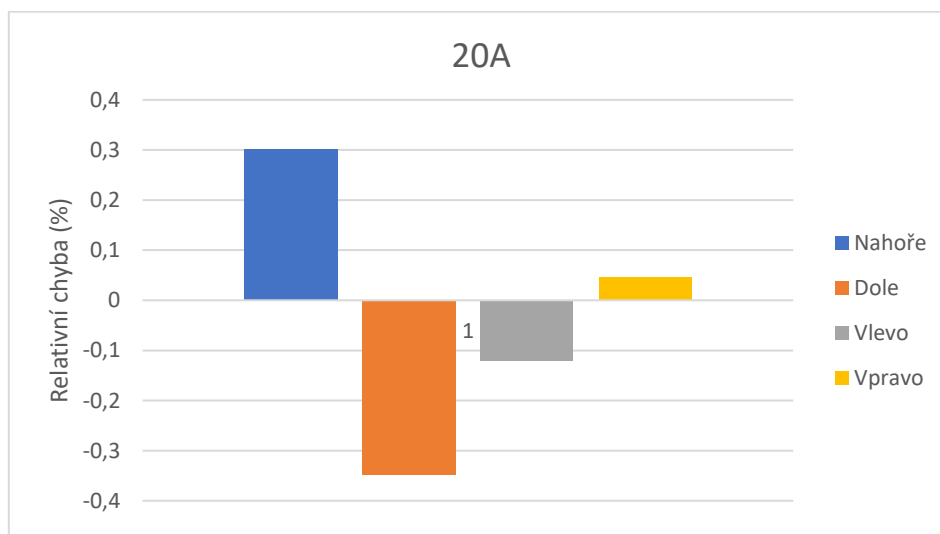
Se zvyšováním proudu se kolem vodiče indukovalo silnější magnetické pole, které sekundární obvod převáděl na hodnoty bližší referenční hodnotě, tudíž se snižovala relativní chyba. Jak lze vidět v Tabulka 4., hodnota měřená v horní poloze je o poznání nižší než referenční hodnota.

Následně chyba v dolní poloze byla ve všech měřeních téměř konstantní 0,3 %, tato chyba byla záporná, tudíž měřená hodnota byla vyšší, než referenční. Následně pro polohy příčné vzhledem k ose (vlevo a vpravo) se chyba zvýšila přibližně o 0.1 %. Jediný rozdíl mezi nimi byl ten, že chyba pro polohu vlevo byla záporná a vpravo kladná.

Tedy z výsledků vyplývá, že relativní chyba závisí na vzdálenosti vodiče od sekundárního vinutí proudových kleští a proudem, který vodičem protéká. Výsledné hodnoty by se také daly použít jako korekční tabulka k odstranění těchto chyb. Stejně, jako u předchozího měření i do tohoto byly zaimplementovány nejistoty měření.



Obrázek 29. Závislost chyby na poloze vodiče při 5 A



Obrázek 30. Závislost chyby na poloze vodiče při 20 A

12. Závěr

Tato bakalářská práce se ve výsledku dá rozdělit na dvě samostatné části, které se ale zpracováním prolínají. Hlavním cílem této práce bylo zjistit vlastnosti proudového transformátoru, který generuje při měření aditivní chybu údaje v závislosti na poloze měřeného vodiče vzhledem k proudovým kleštím a v závislosti na velikosti zátěže proudového transformátoru.

Pro tento účel byly vytvořeny dvě softwarové aplikace, které umožnily tato měření provádět automatizovaně. Obě aplikace používají jako výchozí zdroj proudu kalibrátor OMICRON CMC256plus a využívají ke komunikaci funkcí přístrojového driveru. První aplikace měří velikost chyby měření proudového transformátoru v závislosti na velikosti zátěže v sekundárním obvodu proudového transformátoru. Druhá aplikace měří velikost chyby měření proudu proudovými kleštěmi v závislosti na poloze měřeného vodiče vůči ose proudových kleští. Obě dvě aplikace byly po naprogramování ověřeny při praktickém měření, jehož výsledky jsou zpracovány ve formě tabulek a grafů v příloze této práce.

Tudíž po zhodnocení naměřených hodnot a vykreslení charakteristik jsem splnil všechny body zadání. Jak je možno vidět výše, výsledné průběhy pro měření chyby v závislosti na zátěži nelze nahradit lineární křivkou, jelikož se jedná o složitou polynomičnou funkci. Velikost chyby se měnila v závislosti na velikosti měřeného proudu. Velikost této chyby nelze vyjádřit jednoduchou matematickou funkcí, a pokud bychom ji chtěli eliminovat, bylo by vhodné do firmware přístroje, který spolupracuje s uvedenými proudovými transformátory, implementovat korekční tabulku v závislosti na velikosti zátěže, nebo ještě lépe provádět měření s minimální velikostí zátěže. To bude vhodné zejména pro přesná laboratorní měření. Softwarová aplikace je univerzální a může být použita pro zjištění chyb i u jiných typů proudových transformátorů. V případě měření vlivu polohy vodiče na chybu proudových kleští jsme zjistili, že největší chyba se vyskytuje v horní poloze (poloha nejvzdálenější od středu kleští) a čím větší teče proud měřeným vodičem, tím je chyba v této poloze menší. Tudíž chyba závisí na vzdálenosti vodiče od sekundárního vinutí proudových kleští (tzn. že čím je vzdálenost větší tím je i chyba).

Vytvořené softwarové aplikace se dají použít k proměřování proudových transformátorů a zjišťování chyb přístrojů v závislosti na poloze vodiče, v závislosti na zátěži proudového transformátoru, případně při různých ovlivňujících podmínkách měření (teplota, frekvence apod.). Následně je vhodné z naměřených výsledků vytvořit korekční tabulku a prakticky naměřené hodnoty pomocí uvedených proudových transformátorů takto korigovat, což přispěje k významnému zvýšení přesnosti měření. Následně by se tato práce dala doplnit ještě o problematiku frekvenční a teplotní závislosti transformátoru.

Literatura

- [1] JEZIERSKI, Eugeniusz. *Transformátory: teoretické základy*. Praha: Academia, 1973. [cit. 2019-04-22]
- [2] VÁCLAV KONÍČEK: Elektrické stroje [online]. 2015 [cit. 2019-04-22]. Dostupný z <http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/sps/el-stroje-apristroje/transformatory.pdf>
- [3] MLČÁK, Tomáš a Václav VRÁNA. 9. *TRANSFORMÁTOR* [online]. 2016, s. 9 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/9_trafa_sylab_bc_06.pdf
- [4] KOPEČEK, Jan a Miloš DVOŘÁK. *Přístrojové transformátory (měřicí a jistící)*. Praha: Academia, 1966 [cit. 2019-04-22].
- [5] *Elektrotechnická měření*. Praha: BEN – technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-022-9 [cit. 2019-04-22].
- [6] WITTASSEK, Tomáš. *Virtuální instrumentace I: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3395-8.
- [7] KRETSCHMEROVÁ, Lenka a Jaroslav VLACH. *Programování v LabVIEW v příkladech* [online]. [cit. 2019-04-22].
- [8] How to Use an Instrument Driver in LabVIEW Tutorial. www.ni.com [online]. 2019 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: http://www.ni.com/tutorial/2804/en/?fbclid=IwAR0eYvIn5mX_Gks-9awYGE4-vAQrQPcrMVtW3Fqe2spi6PqN8IIIONBvtTqs
- [9] *CMC 256plus: Brochure* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.omicronenergy.com/en/products/cmc-256plus/>
- [10] *CMC 256plus: User Manual* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <http://userequip.com/files/specs/6009/CMC%20256plus%20User%20Manual.pdf>
- [11] - *Agilent U3606A Multimeter/DC power supply: User's and Service Guide*[online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: https://doc.xdevs.com/doc/HP_Agilent_Keysight/English%20_%202013-04-05%20_%20PDF%209.48%20MB%20U3606-90013%20c20140711%20%5B287%5D.pdf?fbclid=IwAR1xqLr8cZV4vEY1cBD0IgoDuDnk25_VJaubb9-TMdcnBw9_3EewVelKm-w
- [12] *WT210/WT230 Digital Power Meter: User's Manual* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: http://www.yokogawa.co.jp/ftp/dist/ks/eusers/wt/ked5s/im/IM760401-01E_041.pdf
- [13] [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/en/pdx-2905781-pn-U3606B/multimeter-dc-power-supply?cc=CZ&lc=eng>

[14] [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://tmi.yokogawa.com/uk/solutions/products/power-analyzers/wt210wt230-digital-power-meters/>

[15] BIČOVSKÁ, Blanka. *Elektrická měření: Učební text* [online]. Ostrava: VŠB – TUO, 2007 [cit. 2019-04-22].

[16] SCHOVÁNEK, Petr a Vítězslav HAVRÁNEK. Chyby a nejistoty měření. *Portál moderní fyziky* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/pext2-nejistoty.pdf>

[17] Směrodatná odchylka. *Jihočeská univerzita České Budějovice* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://matematika.cz/smerodatna-odchylka>

Přílohy

- I. Příloha v IS EDISON – Aplikace LabVIEW pro závislost na zátěži sekundárního obvodu
- II. Příloha v IS EDISON – Aplikace LabVIEW pro závislost na poloze vodiče
- III. Příloha v IS EDISON – Tabulky a charakteristiky naměřených hodnot